

Научная статья

УДК 621.33:631.3

DOI: 10.55196/2411-3492-2025-4-50-111-117

Тяговый электропривод опорно-тяговых модулей для сельскохозяйственной техники

**Римма Инарикоевна Себетова^{✉1}, Эмма Юрьевна Икоева²,
Ирма Владимировна Дзарагасова³**

Горский государственный аграрный университет, улица Кирова, 37, Владикавказ, Россия, 362040

^{✉1}rimmasebetova@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0003-1759-5688>

²ikoevaemmayurievnaeyu.ikoeva@gorskigau.com, <https://orcid.org/0009-0006-9680-0572>

³irmadzaragasova@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0005-2017-327X>

Аннотация. В статье рассматривается актуальная тема – применение электропривода опорно-тяговых модулей (ОТМ) для сельскохозяйственной техники. Применение ОТМ целесообразно при скоростях движения до 7–8 км/ч. При трогании с места, разгоне, работе в тяжелых дорожных условиях движители должны обеспечивать максимальные тяговые усилия. При этом снижение энергетических показателей тягового двигателя приводит к необходимости повышения его номинальной мощности. Известные методики не позволяют однозначно выбрать номинальную мощность двигателя. При выборе типа привода для работы в труднодоступных местах решающими факторами должны стать его надежность и долговечность. Авторы пришли к выводу, что частотный привод является наиболее перспективным, позволяющим радикально решить проблему тягового привода, поэтому его применение в ОТМ является монопольно необходимым. Основной частью частотного привода является преобразователь частоты (ПЧ), который выполняет две функции: энергетическую – функцию питания двигателя и информационную – управление движителями. По результатам исследования установлено, что неуправляемый выпрямитель, выполненный на базе мостовой трехфазной схемы, позволяет уменьшить число управляемых тиристоров, значительно повысить коэффициент мощности преобразователя и ослабить отрицательное влияние ПЧ на генератор. Регулирование напряжения в нем осуществляется способом широтно-импульсной модуляции по синусоидальному закону. Данный преобразователь частоты позволяет получить качественные статические и динамические характеристики, высокие энергетические показатели применения асинхронного короткозамкнутого двигателя.

Ключевые слова: тяговый электропривод, асинхронный двигатель, преобразователь частоты, выпрямитель, управляемый тиристор, реверс, динамическое торможение

Для цитирования: Себетова Р. И., Икоева Э. Ю., Дзарагасова И. В. Тяговый электропривод опорно-тяговых модулей для сельскохозяйственной техники // Известия Кабардино-Балкарского государственного аграрного университета им. В. М. Кокова. 2025. № 4(50). С. 111–117. DOI: 10.55196/2411-3492-2025-4-50-111-117

Original article

Traction electric drive of traction modules for agricultural machinery

Rimma I. Sebetova^{✉1}, Emma Yu. Ikoeva², Irma V. Dzaragashova³

Gorsky State Agrarian University, 37 Kirov Street, Vladikavkaz, Russia, 362040

^{✉1}rimmasebetova@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0003-1759-5688>

²ikoevaemmayurievnaeyu.ikoeva@gorskigau.com, <https://orcid.org/0009-0006-9680-0572>

³irmadzaragashova@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0005-2017-327X>

Abstract. The article discusses the current topic of using electric drives for support and traction modules for agricultural machinery. The use of support and traction modules is advisable at travel speeds of up to 7–8 km/h. When starting off, accelerating, and operating in difficult road conditions, the drive units must provide maximum traction. At the same time, the reduction in the energy performance of the traction motor leads to the need to increase its rated power. However, existing methods do not allow a definitive determination of the motor's nominal power. When selecting a drive type for applications in hard-to-reach areas, reliability and durability should be the deciding factors. The authors concluded that the frequency-controlled drive is the most promising. Such a drive offers a radical solution to the traction drive problem. Therefore, the use of a frequency drive in support and traction modules is absolutely necessary. In a frequency drive, the main part is the frequency converter (FC), which performs two functions: energy – the function of powering the motor and information – controlling the drive units. The results of the study showed that an uncontrolled rectifier based on a three-phase bridge circuit allows a reduction in the number of control thyristors, a significant increase in the power factor of the converter, and a reduction in the negative impact of the frequency converter on the generator. Voltage regulation in it is carried out by pulse-width modulation according to a sinusoidal law. This frequency converter allows to obtain high-quality static and dynamic characteristics, high energy indicators of the use of an asynchronous squirrel-cage motor.

Keywords: traction electric drive, asynchronous motor, frequency converter, rectifier, controlled thyristor, reverse, dynamic braking

For citation: Sebetova R.I., Ikoeva E.Yu., Dzaragasova I.V. Traction electric drive of traction modules for agricultural machinery. *Izvestiya of Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V.M. Kokov.* 2025;4(50):111–117. (In Russ.). DOI: 10.55196/2411-3492-2025-4-50-111-117

Введение. Совершенствование и эффективное функционирование всех систем и механизмов автомобилей, тракторов, самоходных сельскохозяйственных машин и другой специализированной мобильной техники является важным условием социального и экономического развития нашей страны и улучшения экологической ситуации. Тенденции развития автотранспортных средств показывают, что улучшение их эксплуатационных показателей может быть достигнуто посредством более широкого применения электрического привода для отдельных механизмов и агрегатов, также при использовании электрической тяги и режима генераторного торможения с рекуперацией энергии для главного транспортного процесса – передвижения.

Актуальным вопросом в работе является использование тягового электрического привода в транспортных средствах, что дает ряд очевидных преимуществ – экономия топлива и снижение вредных выбросов [1]. Кроме того, электропривод способен обеспечить качественное улучшение эксплуатационных характеристик: повышение надежности и ремонтопригодности, облегчение управления за счет исключения коробки передач, повышение точностных и динамических характеристи-

стик, реализация новых режимов (рекуперация энергии торможения, движение при выключенном ДВС, удержание и плавный старт на уклоне), меньшая зависимость от факторов окружающей среды [2].

Для функционирования системы привода необходимо использование качественной векторной системы управления [3]. Такая система должна обеспечивать оптимальный по потерям режим работы двигателей во всех диапазонах частот вращения, электромагнитных моментов, скольжений, индукций и т. п. Для тяговых приводов необходимо также учитывать критерий максимального использования имеющихся ресурсов, прежде всего напряжения питания и тока, которые ограничиваются установленной мощностью силового преобразователя.

При работе в составе транспортного средства параметры тяговых асинхронных двигателей сильно зависят от режимов его работы [4]. В связи с этим была разработана методика экспериментального определения параметров асинхронных двигателей, методика согласования параметров электрических машин и силового преобразователя, позволяющая минимизировать установленную мощность преобразователя.

Широкое применение опорно-тяговых модулей ограничивается отсутствием рационального тягового привода. О сложности задачи создания последнего говорит тот факт, что несмотря на большой размах работ по этому вопросу, проблема и по настоящее время не достигла технико-экономического уровня, необходимого для широкой практической реализации. Созданы лишь опытные образцы.

Особенность проектирования тягового привода для активных сельскохозяйственных модулей обусловлена рядом специфических свойств их конструкции и эксплуатации [5]. Поэтому ряд исходных положений классической методики расчета и рекомендаций по разработке тяговых приводов общепромышленного назначения, тяговых приводов для рельсового транспорта и автотранспорта применительно к тяговому электроприводу опорно-тяговых модулей (ОТМ) требуют существенного уточнения, а в некоторых случаях – разработки присущих только им принципов установления номинальных массогабаритных, энергетических, экономических и других показателей.

Цель исследования – разработка тягового электропривода для опорно-тяговых модулей сельхозмашин.

Материалы, методы и объекты исследования. Для достижения указанной цели использованы теоретические и эмпирические методы анализа обобщения и сравнения.

Объектом исследования является частотный преобразователь для опорно-тягового привода сельхозмашин.

Результаты исследования. Применение ОТМ целесообразно при скоростях движения до 7–8 км/ч. При трогании с места, разгоне, работе в тяжелых дорожных условиях (работа на низких скоростях) движители должны обеспечивать максимальные тяговые усилия.

При этом снижение энергетических показателей тягового двигателя приводит к необходимости повышения его мощности.

Повысить не только тягово-цепные, но и все показатели агрегата позволяет рациональный выбор параметров привода, и в первую очередь – его номинальной мощности. Известные методики не позволяют однозначно выбрать номинальную мощность двигателя [1].

Согласно данным литературных источников [6, 7], при выборе типа привода в труднодоступных местах, при значительных колебаниях температуры, большой запыленности и влажности, в условиях тряски, вибрации и ударных нагрузках решающими факторами должны стать его надежность и долговечность.

Асинхронный короткозамкнутый двигатель является самой простой, надежной, почти не требующей ухода электрической машиной. Кроме того, его применение при частотном управлении позволяет обеспечить плавное регулирование скорости в широком диапазоне.

Получаемые механические характеристики обладают высокой жесткостью.

При этом обеспечиваются высокие энергетические показатели привода.

Частотный привод является одним из наиболее перспективных, позволяющим радикально решить проблему тягового привода. Поэтому применение частотного привода в ОТМ является монопольно необходимым.

Частотный привод представляет собой сложную квазинепрерывную систему, основной частью которой является преобразователь частоты (ПЧ), который выполняет две функции: энергетическую – функцию питания двигателя и информационную – управление движителями [8]. Основными требованиями к нему являются:

- обеспечение необходимого диапазона регулирования (1–20 и более);
- обеспечение плавности регулирования, постоянства жесткости механических характеристик, высоких энергетических показателей, синусоидальной формы тока в двигателе во всем диапазоне регулирования;
- возможность регулирования напряжения от нуля до номинального значения и частоты от нуля до номинальной (а при необходимости и выше) по необходимому закону;
- сохранение перегрузочной способности двигателя на низких частотах;
- стабильность и надежность в любой точке диапазона регулирования;
- минимум отрицательных влияний на источник питания;
- возможность реверса и динамического торможения;

– быстродействие при изменении характера нагрузки.

Существующие преобразователи частоты делятся на две группы – машинные и статические.

Отсутствие жесткой механической связи между энергетическими средствами и ОТМ ограничивает применение преобразователей первой группы ввиду их большой инерционности [3]. Основным фактором, определяющим структуру преобразователей частоты второго класса, является способ регулирования напряжения. По этому признаку ПЧ можно разделить на два класса:

– непосредственное преобразование периодического напряжения частоты сети в периодическое напряжение управляемой частоты;

– двухзвенные преобразователи, в которых периодическое напряжение сначала выпрямляется, а затем инвертируется.

Преобразователи первого класса, имея ряд преимуществ, обладают и существенными

недостатками: ограниченной выходной частотой, не превышающей 40% частоты сети; отрицательным влиянием на генератор.

По способу формирования и регулирования напряжения преобразователи частоты второго класса делятся на два вида: с неуправляемыми и управляемыми выпрямителями. Преобразователи с управляемыми выпрямителями ввиду ухудшения условий коммутации при снижении напряжения имеют ограниченный диапазон регулирования снизу.

Преобразователь частоты, изображенный на рисунке 1, близок к идеальному. Неуправляемый выпрямитель, выполненный на базе мостовой трехфазной схемы, позволяет уменьшить число управляющих тиристоров, значительно повысить коэффициент мощности преобразователя и ослабить отрицательное влияние ПЧ на генератор. Силовая часть преобразователя представляет собой автономный инвертор напряжения, выполненный по схеме Макмурри [9].

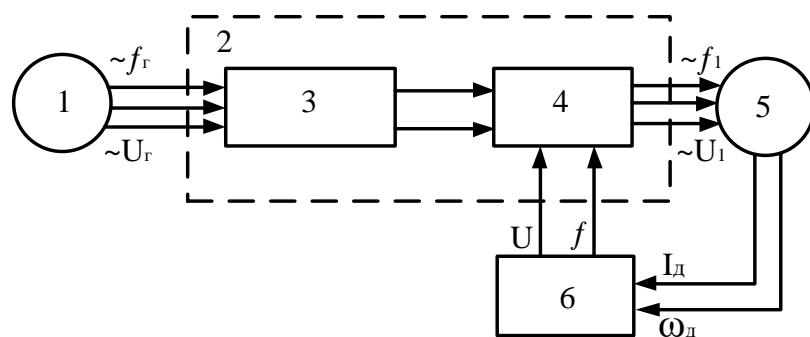


Рисунок 1. Структурная схема тягового двигателя:

1 – дизель-генератор; $\sim U_g$ и $\sim f_g$ – напряжение и частота генератора; 2 – преобразователь частоты; 3 – неуправляемый выпрямитель; 4 – автономный инвертор напряжения; 5 – тяговый двигатель; $\sim U_1$ и $\sim f_1$ – напряжение и частота тягового двигателя; I_d и ω_d – сила тока и частота вращения тягового двигателя; 6 – система управления тягового двигателя; U и f – напряжение и частота системы управления преобразователем

Figure 1. Structural diagram of the traction motor;

1 – diesel generator; $\sim U_r$ and $\sim f_r$ – voltage and frequency of the generator; 2 – frequency converter; 3 – uncontrollable rectifier; 4 – autonomous voltage inverter; 5 – traction motor; $\sim U_1$ and $\sim f_1$ – voltage and frequency of the traction motor; I_d and ω_d – current and rotational speed of the traction motor; 6 – traction motor control system; U and f – voltage and frequency of the control system of the frequency converter

Регулирование напряжения в нем осуществляется способом широтно-импульсной модуляции по синусоидальному закону.

Данный преобразователь частоты позволяет получить качественные статические и динамические характеристики, высокие энергетические показатели.

Недостатком данного привода является сложность системы управления инвертором, его стоимость. Однако экономические показатели данного привода при обоснованном применении показателей сравнения, учитывающих не только стоимость оборудования, но и значительные капитальные вложения на

запасные части, специфические эксплуатационные расходы, затраты на профилактические ремонты, убытки из-за простоев при неполадках, затраты на электроэнергию и дизельное топливо, становятся сравнимы с показателями других приводов [10, 12].

Кроме того, существенными и решающими факторами целесообразности применения описанного привода для ОТМ являются его большая надежность и долговечность.

Выводы. Частотный привод является одним из наиболее перспективных, позволяющим радикально решить проблему тягового привода, поэтому его применение в ОТМ является монопольно необходимым.

Неуправляемый выпрямитель, выполненный на базе мостовой трехфазной схемы, позволяет уменьшить число управляющих тиристоров, значительно повысить коэффициент мощности преобразователя и ослабить отрицательное влияние ПЧ на генератор. Силовая часть преобразователя представляет собой автономный инвертор напряжения.

Регулирование напряжения в нем осуществляется способом широтно-импульсной модуляции по синусоидальному закону.

Данный преобразователь частоты позволяет получить качественные статические и динамические характеристики, высокие энергетические показатели.

Список источников

1. Сафиуллин Р. Н. Шаряков В. А., Резниченко В. В. Системы тягового электропривода транспортных средств: учебное пособие; под ред. Р. Н. Сафиуллина. Москва; Берлин: Директ-Медиа, 2020. 364 с. ISBN: 978-5-4499-1610-5. EDN: TNBBOT
2. Обоснование выбора параметров электромеханической трансмиссии для трактора тягового класса 0,6-0,9 и согласование тяговых характеристик / З. А. Годжаев, С. Е. Сенькович, И. С. Алексеев [и др.] // АгроИнженерия. 2023. Т. 25. № 1. С. 63–70. DOI: 10.26897/2687-1149-2023-1-63-70. EDN: LKJWSF
3. Еремочкин С. Ю., Дорохов Д. В. Разработка и исследование однофазного асинхронного электропривода сельскохозяйственной машины с полупроводниковым устройством регулирования скорости // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2022. № 10(216). С. 89–100. DOI: 10.53083/1996-4277-2022-216-10-89-100. EDN: BADJAH
4. Регулирование скорости асинхронного двигателя / Ю. Н. Больщаков, И. В. Макарихин, В. В. Зотов, А. А. Монахов // Актуальные исследования. 2022. № 37(116). С. 23–28. EDN: DEWNIV
5. Тенденции развития сельскохозяйственной электрифицированной мобильной техники / Л. Ю. Юферев, А. П. Споров, В. А. Гусаров, Д. Ю. Писарев // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2022. Т. 69. № 1(46). С. 3–8. DOI: 10.22314/2658-4859-2022-69-1-3-8. EDN: SGJMPH
6. Исследование разомкнутой системы электропривода «преобразователь частоты – асинхронный двигатель» / В. С. Головко, Д. А. Легких, Д. А. Юровских, А. А. Верхотурцева // Молодой ученый. 2021. № 20(362). С. 78–80. EDN: PPJASK
7. Суптель А. А. Асинхронный частотно-регулируемый электропривод: учеб. пособие. Чебоксары, 2000. 163 с. ISBN 5-7677-0372-8
8. Энергоэффективное управление асинхронным электродвигателем / Д. А. Васильев, Л. А. Пантелеева, П. Н. Покоев, В. А. Носков // Вестник НГИЭИ. 2019. № 4(95). С. 100–115. EDN: ZHDKYX
9. Томашевский Д. Н. Автономные инверторы: учебное пособие. Екатеринбург: Уральский федеральный университет им. Первого президента России Б. Н. Ельцина, 2019. 120 с. ISBN: 978-5-7996-2681-5. EDN: LOJNVT
10. Споров А. П., Писарев Д. Ю., Парахнич А. С. Электропривод транспортного средства сельскохозяйственного назначения // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2021. Том 15. № 3. С. 48–54. DOI: 10.22314/2073-7599-2021-15-3-48-54. EDN: PISTZI
11. Юферев Л. Ю., Споров А. П. Конструкция и компоновка электрического мобильного транспортного средства для фермерского хозяйства // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2022. Т. 69. № 3(48). С. 89–94. DOI: 10.22314/2658-4859-2022-69-3-89-94. EDN: GEPWPU
12. Иванова В. Р., Киселев И. Н. Частотно-регулируемый электропривод для энергосбережения и оптимизации технологических процессов в электротехнических комплексах // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2019. Том 21. № 5. С. 59–70. DOI: 10.30724/1998-9903-2019-21-5-59-70. EDN: FJSXVL

References

1. Safiullin R.N., Sharyakov V.A., Reznichenko V.V. *Sistemy tyagovogo elektroprivoda transportnyh sredstv: uchebnoe posobie; pod red. R. N. Safiullina* [Traction electric drive systems of vehicles: a tutorial; edited by R. N. Safiullin]. Moscow; Berlin: Direct-Media, 2020. 364 p. ISBN: 978-5-4499-1610-5. (In Russ.). EDN: TNBBOT
2. Godzhaev Z.A., Senkevich S.E., Alekseev I.S. [et al.]. Justification of the parameters of an electromechanical transmission for a tractor of traction class of 0.6-0.9 traction class and coordination of traction characteristics. *Agricultural engineering*. 2023;25(1):63–70. (In Russ.) DOI: 10.26897/2687-1149-2023-1-63-70. EDN: LKJWSF
3. Eremochkin S.Yu., Dorokhov D.V. Development and Research of a Single-Phase Asynchronous Electric Drive for an Agricultural Machine with a Semiconductor Speed Control Device. *Bulletin of Altai state agricultural university*. 2022;10(216):89–100. (In Russ.). DOI: 10.53083/1996-4277-2022-216-10-89-100. EDN: BADJAH
4. Bolshakov Yu.N., Makarikhin I.V., Zотов V.V., Monakhov A.A. Asynchronous motor speed control. *Current research*. 2022;37 (116):23–28. (In Russ.). EDN: DEWNIV
5. Yuferev L.Yu., Sporov A.P., Gusarov V.A.- et al. Trends in the development of agricultural electrified mobile equipment. *Electrical technology and equipment in the agro-industrial complex*. 2022;69(1):3–8. (In Russ.). DOI: 10.22314/2658-4859-2022-69-1-3-8. EDN: SGJMPH
6. Golovko V.S., Legikh D.A., Yurovskikh D.A., Verkhoturtseva A.A. Research of the Open System of the Electric Drive "Frequency Converter – Asynchronous Motor". *Young Scientist*. 2021;20(362):78–80. (In Russ.). EDN: PPJASK
7. Suptel A.A. *Asinhronnyj chastotno-reguliruemyj elektroprivod: ucheb.posobie* [Asynchronous variable-frequency electric drive: a tutorial]. Cheboksary, 2000. 163 p. ISBN 5-7677-0372-8. (In Russ.)
8. Vasilyev D.A., Panteleeva L.A., Pokoев P.N., Noskov V.A. Energy efficient asynchronous motor control. *Bulletin NGIEI*. 2019;4 95):100–115. (In Russ.). EDN: ZHDKYX
9. Tomashevsky D.N. *Avtonomnye invertory: uchebnoe posobie* [Autonomous Inverters: a tutorial]. Yekaterinburg: Ural'skij federal'nyj universitet im. Pervogo prezidenta Rossii B. N. El'cina, 2019. 120 p. ISBN: 978 5 7996 2681 5. . (In Russ.). EDN: LOJNVT
10. Sporov A.P., Pisarev D.Yu., Parakhnich A.S. Electric Drive for an Agricultural Vehicle. *Agricultural machinery and technologies*. 2021;15(3):48–54. (In Russ.). DOI: 10.22314/2073-7599-2021-15-3-48-54. EDN: PISTZI
11. Yuferev L.Yu., Sporov A.P. Design and layout of an electric mobile vehicle for farming. *Electrical technology and equipment in the agro-industrial complex*. 2022;69(3):89–94. (In Russ.) DOI: 10.22314/2658-4859-2022-69-3-89-94. EDN: GEPWPU
12. Ivanova V.R., Kiselev I.N. Frequency-adjustable electric drive for energy saving and optimization of technological processes in electrical complexes. *Power engineering: research, equipment, technology* 2019;21(5):59–70. (In Russ.). DOI: 10.30724/1998-9903-2019-21-5-59-70. EDN: FJSXVL

Сведения об авторах

Себетова Римма Инарикоевна – старший преподаватель кафедры электрооборудования, электротехнологий и энергообеспечения предприятий, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Горский государственный аграрный университет», SPIN-код:1123-1937

Икоева Эмма Юрьевна – кандидат технических наук, доцент кафедры электрооборудования, электротехнологий и энергообеспечения предприятий, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Горский государственный аграрный университет», SPIN-код: 7410-7508

Дзарагасова Ирма Владимировна – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры электрооборудования, электротехнологий и энергообеспечения предприятий, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Горский государственный аграрный университет», SPIN-код: 4890-5664

Information about the authors

Rimma I. Sebetova – Senior Lecturer, Department of Electrical Equipment, Electrical Technologies, and Energy Supply of Enterprises, Gorsky State Agrarian University, SPIN-code: 1123-1937

Emma Yu. Ikoeva – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Electrical Equipment, Electrical Technologies and Energy Supply of Enterprises, Gorsky State Agrarian University, SPIN-code: 7410-7508

Irma V. Dzaragashova – Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor of the Department of Electrical Equipment, Electrical Technologies and Energy Supply of Enterprises, Gorsk State Agrarian University, SPIN-code: 4890-5664

Авторский вклад. Все авторы принимали непосредственное участие в планировании, выполнении и анализе данного исследования. Все авторы ознакомились и одобрили окончательный вариант статьи.

Author's contribution. All authors have directly participated in the planning, execution and analysis of this study. All authors have read and approved the final version of this article.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

*Статья поступила в редакцию 17.11.2025;
одобрена после рецензирования 05.12.2025;
принята к публикации 12.12.2025.*

*The article was submitted 17.11.2025;
approved after reviewing 05.12.2025;
accepted for publication 12.12.2025.*